

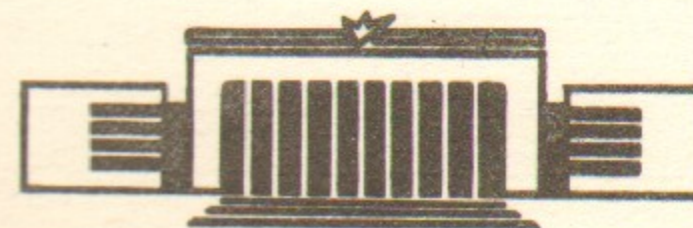
48



ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев,  
О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник  
ЗАЩИТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ОБОЛОЧКА

ПРЕПРИНТ 83—77



НОВОСИБИРСК

ЗАЩИТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ОБОЛОЧКА

В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев,  
О.К.Мыскин, В.М.Панаскич, Ф.А.Цельник

А Н Н О Т А Ц И Я

Описан способ создания кольцевой плазменной оболочки, используемой для защиты горячей плазмы от потоков примесей и газа со стенок вакуумной камеры. Диаметр оболочки 30 см, толщина "стенки" 1,5 см, длина 2,5 м, плотность от  $10^{13}$  до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Оболочка ослабляет падающий снаружи поток гелия в 10 раз, а поток водорода - в 20 раз.

Вопрос о защите горячей плазмы в магнитных ловушках от примесей тяжелых элементов, поступающих со стенок камеры, неоднократно обсуждался. В частности, в работах [1+3] предлагалось для этой цели создавать с помощью специальных источников непрозрачную для примесей пристеночную плазменную оболочку.

Такой способ защиты горячей плазмы используется в ловушке с вращающейся плазмой СВИШ [4] (рис.1).

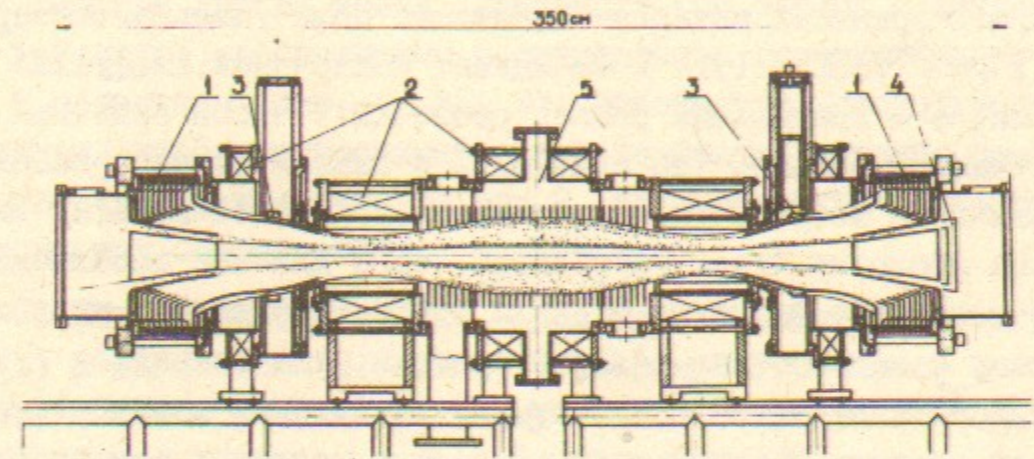


Рис.1. Установка СВИШ.

1 - кольцевые электроды для создания радиального электрического поля; 2 - катушки магнитного поля; 3 - кольцевые инжекторы защитной оболочки; 4 - кольцевой инжектор внутреннего плазменного электрода (потенциал электрода до  $-30$  кВ); 5 - центральная камера.

Допустимая в установке толщина оболочки  $d$  может быть порядка 1 см при её среднем радиусе в экваториальной плоскости пробкотрона  $R = 13$  см. На толщине  $d$  интенсивность потока атомов, выбиваемых со стенок камеры, нужно уменьшить на несколько порядков. Для этого оболочка, во-первых, должна иметь достаточно высокую температуру электронной компоненты или, по крайней мере, содержать группу электронов с энергией и плот-

ностью, достаточными для ионизации с высокой вероятностью атомов примесей. Во-вторых, оболочка должна обеспечить удаление образовавшихся ионов, чтобы предотвратить их диффузию из оболочки в горячую плазму. Механизм удаления ионов возникает естественно, если формировать оболочку с помощью продольного потока плазмы, имеющего гидродинамическую скорость  $V$  вдоль магнитного поля установки. Тогда ионы примесей, сталкиваясь с ионами оболочки, приобретают практически такую же скорость и "смываются" потоком в специальные приемные камеры (рис.1). Поток ионов примесей поперек магнитного поля уменьшается при этом в  $\exp(-d^2/L^2)$  раз ( $D$  - коэффициент поперечной диффузии ионов примеси,  $L$  - продольный размер оболочки). Чтобы величина  $D$  не была слишком большой (по сравнению с классической), необходима стабилизация хотя бы гидродинамической неустойчивости. Внешняя граница оболочки будет устойчивой, если для нее выполнено условие "среднего минимума В". Для этого требуется продолжить оболочку в запробочные области ловушки, где магнитное поле имеет "благоприятную" кривизну. На внутренней границе (как и во всей области горячей плазмы) должна работать центробежная стабилизация [3]. Способствует устойчивости также электрический контакт оболочки с проводящими торцами, который в случае проточной, т.е. неудариваемой в ловушке плазмы, должен быть хорошим. Таким образом, инжектор плазменной оболочки должен обеспечить:

1) плотность быстрых электронов (с энергией  $\geq 50$  эВ) порядка  $10^{13}$  см $^{-3}$ ; 2) малую плотность газа, сопровождающего поток плазмы -  $10^{10} + 10^{11}$  см $^{-3}$ ; 3) азимутальную однородность по плотности на размере порядка радиуса оболочки (мелкомасштабные неоднородности допустимы); 4) плотность плазмы в оболочке порядка  $10^{14}$  см $^{-3}$ . Последнее условие специфично для установки СВМП, где для обеспечения МГД-устойчивости горячей плазмы требуется, чтобы её плотность была меньше плотности защитной оболочки [3,4].

Для генерирования таких плазменных потоков требуется разряд с большой плотностью мощности (десятки киловатт на 1 см периметра потока) и, при требуемой длительности  $\tau \approx 10$  мсек, с большой энергией за импульс. Легко оценить, что при "цене" ион-электронной пары  $\sim 500$  эВ, скорости истечения потока

$\sim 10^6$  см/сек и периметре оболочки  $\sim 1$  м мощность разряда  $\sim 1$  МВт). Опыт показал, что в этом случае целесообразно разбить разряд геометрически на отдельные ячейки (как это было сделано в [5]), т.к. единый разряд при  $\tau \approx 10$  мсек обнаруживает тенденцию к сжатию по азимуту в относительно тонкий стример. Разрядные ячейки (в одном инжекторе их 64) питаются от общей конденсаторной батареи через отдельные балластные сопротивления, так что каждая ячейка по электропитанию практически независима от других - закорачивание или незажигание одной ячейки не влияет на режим разряда других ячеек. Инжекторы (по одному с каждой стороны установки) расположены в специальных расширительных объемах в магнитном поле 4+7 кЭ. Эти объемы при необходимости могут откачиваться встроенными в них гелиевыми крионасосами. Устройство ячейки показано на рис.2. Её конструкция основывается на следующих соображениях:

1. Тип разряда в ячейке - разряд в скрещенных электрическом (E) и магнитном (B) полях (в разрядах указанного типа, в принципе, можно создавать плазму с плотностью до  $10^{16}$  см $^{-3}$  [6]).

2. Катод выбран в виде тонкой иглы с диаметром меньшим или порядка высоты циклоиды, по которой движется образованный в акте ионизации ион. По нашим соображениям, это должно приводить к резкому нарушению квазинейтральности в окрестности катода, т.к. поток ионов на тонкую иглу сильно подавлен магнитным полем. В результате в этой окрестности могут возникнуть условия, способствующие ускорению электронов вследствие коллективных процессов в плазме.

Часть катода выполнена в виде пеннинговской ячейки: пока плотность плазмы мала или вообще равна нулю, ионизация газа производится осциллирующими электронами, ускоряемыми продольной компонентой электрического поля.

3. Для увеличения плотности холодной компоненты плазменной оболочки рядом с ячейкой помещена дополнительная камера, заполняемая газом, поскольку опыт показал (см. ниже), что плазма, генерируемая ячейкой, содержит большое число быстрых (100-200 эВ) электронов, обладающих высокой ионизирующей способностью.

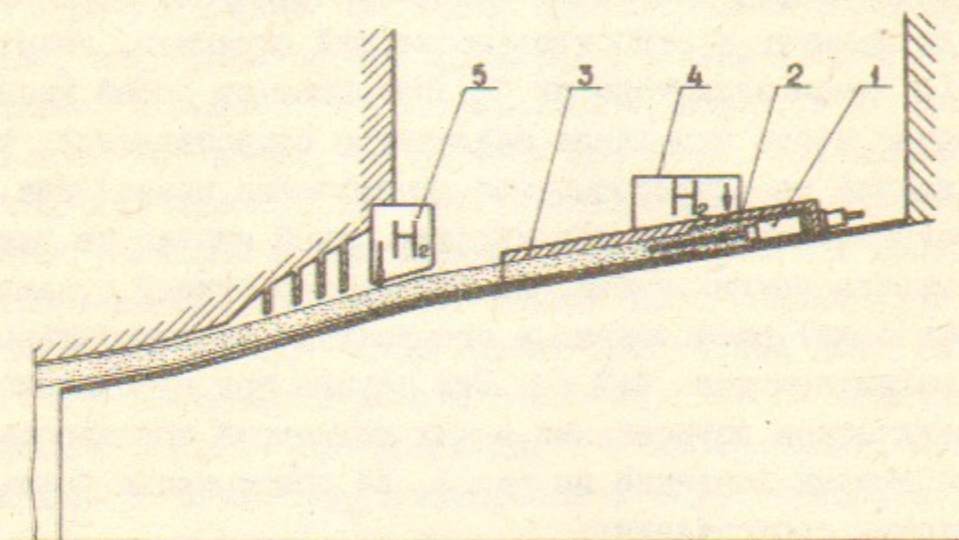


Рис.2. Разрядная ячейка инжектора.

1 - катод; 2 - пеннинговская ячейка; 3 - аноды;  
4 - система подачи газа в инжектор; 5 - система подачи газа в дополнительную камеру.

Эксперимент обнаружил сложный характер разряда (который еще предстоит изучить), но параметры плазмы, вытекающей из ячеек, пригодны для создания оболочки с требуемыми свойствами. Мы ограничимся внешним описанием режимов работы инжектора, не делая пока попытки детального анализа процессов в ячейке.

Разряд зажигается при напряжении на иглах - 1,5-2 кВ. Давление водорода (он подается импульсно за 1-3 мсек до включения напряжения) подбирается минимальным - таким, что при его уменьшении на 10-20% разряд не зажигается. Превышение этого давления (в несколько сотых мм Hg) на 30-50% приводит к уменьшению плотности оболочки. В зависимости от величины балластного сопротивления, ограничивающего ток разряда, могут существовать два режима: высоковольтный - с напряжением горения 800-1000 В и током

иглы 20-50 А, и низковольтный - с напряжением 200-250 В и током 70-200 А. В интервале токов 50-70 А происходят нерегулярные перебросы из одного режима в другой, иногда по нескольку раз в течение импульса. Ток и напряжение разряда промодулированы с частотами в сотни кГц. Глубина модуляции большая в низковольтном режиме и достигает там 30%.

Измерения параметров плазменной оболочки проводились в центральной плоскости лонетки, т.е. на расстоянии 120 см от инжекторов. Нижеприведенные результаты относятся к режиму, когда в дополнительные камеры газ не подается.

Предварительные оптические наблюдения с торца показали, что всегда срабатывает все 64 ячейки. Картина свечения в обоих расширительных объемах и центральной плоскости дает основание утверждать, что по крайней мере сильные неустойчивости в оболочке отсутствуют: по всей длине сохраняется структура из 64 отчетливо видимых и нерасплывающихся струек.

Основной интерес представляют плотность плазменной оболочки и её "непроницаемость" для газа и примесей, поступающих со стенок. "Непроницаемость" характеризуется коэффициентом ослабления  $K = I_0/I = \exp(-nd\langle\sigma v\rangle/u)$ , где  $I_0$  - падающий на оболочку поток газа или примесей,  $I$  - поток, прошедший сквозь неё,  $\langle\sigma v\rangle/u$  - эффективное сечение образования иона из атома примеси,  $u$  - скорость атома примеси. Таким образом, для оценки "непроницаемости" требуется определить показатель экспоненты.

Измерения этих параметров проводились, в основном, методами корпускулярной диагностики (рис.3). Для одной из моделей инжектора использовалось томсоновское рассеяние излучения рубинового лазера. Контроль величины плотности обычно осуществлялся методом отсечки СВЧ-излучения ( $\lambda = 4-8$  мм). Значения плотности газа в различных местах установки измерялись методами корпускулярной диагностики и импульсными газоразрядными манометрами.

Коэффициент ослабления  $K$  определялся с помощью пучка атомов аргона с энергией 4 кэВ (рис.3). Для этого измеряется одновременно поток атомов  $I$ , прошедших сквозь оболочку, и поток  $I^+$  ионов аргона, образовавшихся на оболочке. Система коллиматор-коллектор, измеряющая ионную компоненту, настроена на

прием всех ионов  $Ar^+$ , рождающихся в зоне пересечения оболочки и атомарного пучка. Ионный и атомарный потоки измерялись с помощью идентичных коллекторов из нержавеющей стали без подавления вторичной электронной эмиссии. Как известно (см., например, [7]), коэффициенты вторичной эмиссии  $\delta$  для ионов и атомов с необезгаженных металлических мишеней почти равны, и для аргона с энергией 4 кэВ составляют  $\approx 2$  [8]. Используя это значение  $\delta$ , мы получили в измерениях

$$I^+/I \approx nd \langle \sigma v \rangle / u \approx (4+5) \cdot 10^{-2}$$

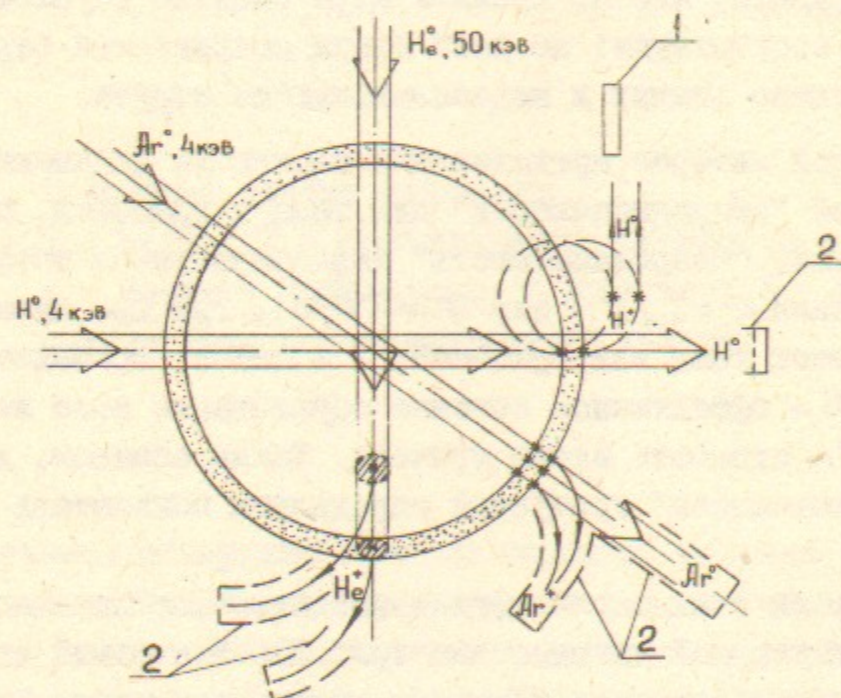


Рис. 3. Схема корпускулярных диагностик.  
1 — перемещающийся анализатор быстрых атомов;  
2 — коллиматоры токоизмерителей.

В этих же экспериментах измерялась плотность плазмы оболочки и её радиальное распределение. Плотность плазмы определялась по ослаблению пучка атомов водорода с энергией 4 кэВ и по перезарядке в оболочке атомов гелия с энергией 50 кэВ с последующей регистрацией ионов  $He^+$  [9]. Оба метода дают  $n \approx (1,5+2) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Распределение плотности по толщине оболочки промерялось методом двойной перезарядки атомов водорода с энергией 4 кэВ [10] путем соответствующего перемещения анализатора быстрых атомов (см. рис. 3). Результат приведен на рис. 4, и из него следует, что  $d \approx 1,5 \text{ см}$  (по уровню  $0,5 n_{\text{max}}$ ). При таких значениях  $n$  и  $d$  вклад в образование ионов  $Ar^+$  от процесса перезарядки ничтожен, и можно утверждать, что они образуются только из-за ионизации электронами оболочки. Нетрудно теперь сделать оценки ослабления потоков примесей, поступающих на оболочку со стенок камеры с тепловыми скоростями, поскольку их потенциалы ионизации и сечения ионизации если и отличаются от аргона, то, как правило, в нужную сторону. Для

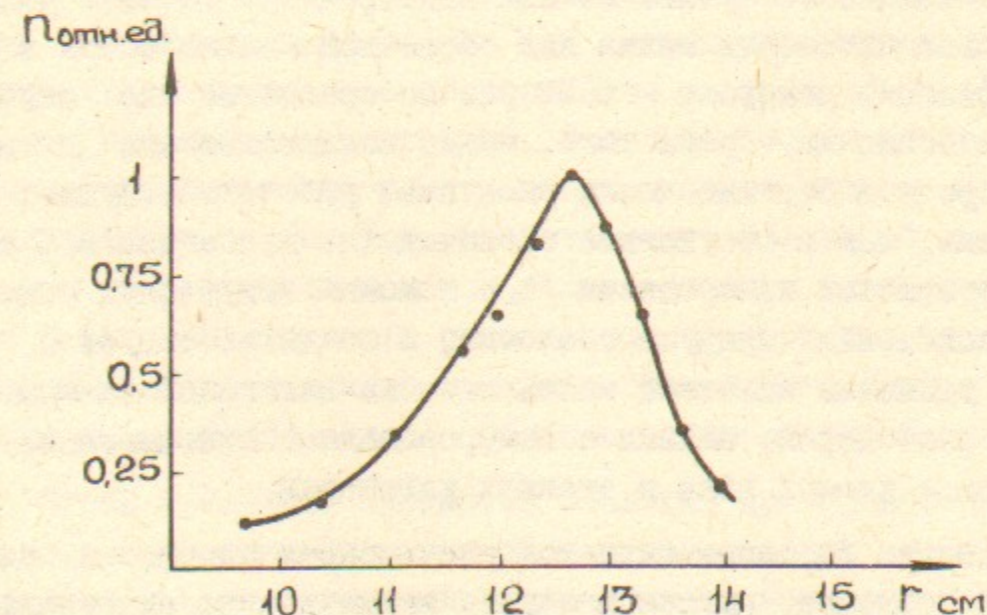


Рис. 4. Пространственный профиль оболочки.

углерода — наиболее легкой из возможных примесей — коэффициент ослабления оказывается не меньше  $10^4$ . Такого же порядка должно быть ослабление для молекулярных азота и кислорода. Пары металлов ослабляются еще сильнее. Эти оценки справедливы, если диффузия ионов примеси поперек струи не очень сильно превышает столкновительную диффузию.

По мере обезгаживания электродов инжектора и стенок вакуумной камеры плотность плазмы в оболочке уменьшается; за несколько тысяч рабочих импульсов  $n$  падает от  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, хотя "непроницаемость" при этом практически не меняется<sup>ж)</sup>. Поэтому было исследовано взаимодействие плазмы оболочки с газом, специально подаваемым в центральную камеру установки импульсными клапанами. На рис. 5 показаны зависимости от времени плотности  $n_0(t)$  гелия в защищаемой оболочкой области при выключенных (кривая 1) и включенных (кривая 2) инжекторах. Пунктирная кривая 3 — плотность оболочки  $n(t)$  в отсутствие гелия, кривая 4 — при подаче гелия. Такие же зависимости для случая подачи водорода показаны на рис. 6. Все кривые сняты с помощью 50 кэВного гелиевого пучка. Из них видно, что в течение рабочего импульса плотность гелия под оболочкой меньше почти в 10 раз, а плотность водорода — в 20 раз по сравнению со случаем отсутствия оболочки. Кроме того, общее количество как гелия, так и водорода в системе после окончания рабочего импульса заметно меньше, чем в отсутствие оболочки (не менее чем в 2 раза). Это подтверждается измерениями  $n_0$  с помощью импульсных манометров, расположенных снаружи оболочки, и свидетельствует о необратимом удалении заметной части газа из вакуумной камеры. По-видимому, этот эффект связан с замуровыванием относительно быстрых ионов и атомов газа в стенках установки.

Уменьшение  $n_0$  сопровождается увеличением плотности плазмы в самой оболочке, причем в случае гелия весьма значительным

<sup>ж)</sup> Существование таких медленных процессов затрудняет подбор конструктивных вариантов инжектора. Поэтому после того, как в одной из моделей удалось получить желаемый результат, дальнейшие изменения конструкции (возможно, упрощающие изготовление) были прекращены.

( в 4 раза), за счет ионизации газа. Можно оценить скорость ухода ионов гелия вдоль оболочки, приравняв поток газа, падающий на её боковую стенку, потоку ионов через поперечное сечение оболочки:

$$I_{\text{He}} = N/\tau = n_{\text{He}}^+ v_{\text{He}}^+ \cdot \pi D d \quad (2)$$

Здесь  $N$  — количество атомов He, инжектируемое в установку к моменту окончания рабочего импульса,  $N = 3 \cdot 10^{18}$ ;  $\tau$  — длительность рабочего импульса,  $v_{\text{He}}^+$  — скорость ухода иона He<sup>+</sup>,  $n_{\text{He}}^+$  — плотность "вторичной" (гелиевой) плазмы. Эта оценка дает  $v_{\text{He}}^+ \approx 1 \cdot 10^5$  см/сек.

Сопоставление результатов по ослаблению пучка атомов аргона и теплового потока атомов гелия показывает, что существует группа быстрых электронов с энергией  $\sim 100$  эВ и плотностью  $(3+4) \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, которая и определяет ионизационные свойства оболочки. Остальные электроны, как это следует из изменений спектра томсоновского рассеяния, имеют температуру (5+7) эВ.

При взаимодействии оболочки с тепловым потоком водорода (рис. 6) кроме ионизации молекул H<sub>2</sub> существенную роль должен играть процесс их диссоциации относительно холодными электронами. Оценка показывает, что при данных параметрах плазмы вероятность диссоциации с образованием быстрых (1+3) эВ атомов порядка вероятности ионизации. Для этих атомов оболочка прозрачна (длина пробега по ионизации и перезарядке  $\sim 10$  см). В результате из-за быстрого разлета таких атомов по камере и большей скорости ухода ионов вдоль оболочки вклад ионизованного газа в её плотность оказывается существенно меньшим, чем в случае инъекции такого же количества гелия. С увеличением потока водорода плотность оболочки монотонно возрастает.

Чтобы увеличить плотность оболочки при проведении экспериментов с вращающейся плазмой и в то же время не ухудшать вакуумные условия, дополнительные потоки водорода подаются в специальные камеры (рис. 2), расположенные вблизи ячеек инжекторов в расширительных объемах. С помощью этих потоков можно увеличивать плотность оболочки до  $n \approx 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> при сохранении её "непроницаемости", контролируемой пучком атомов аргона.

Избыточное увеличение газовых потоков приводит к уменьшению "непроницаемости" и насыщению плотности.

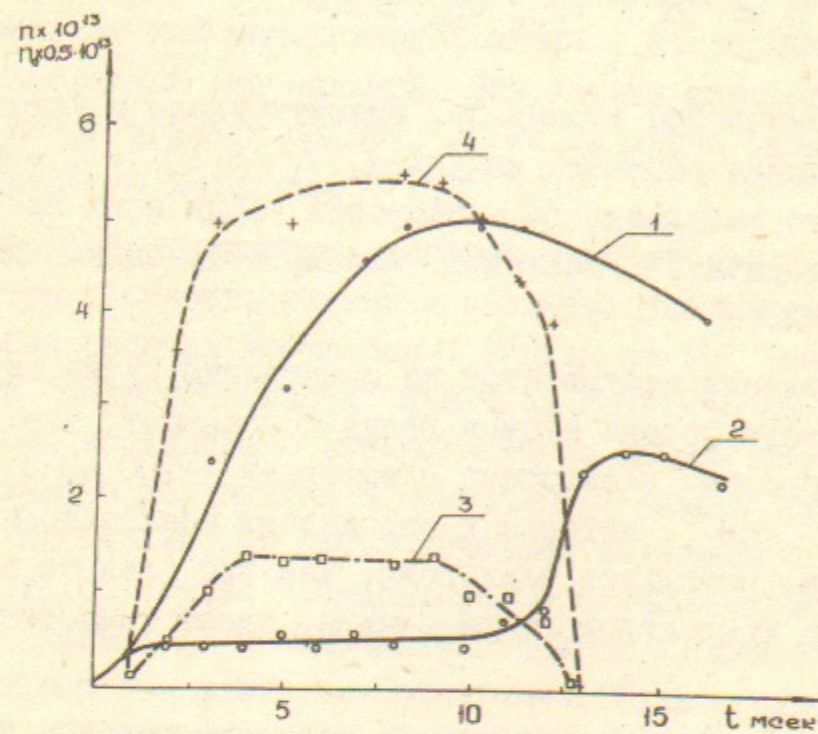


Рис. 5. Временные зависимости плотности оболочки  $n(t)$  и вводимого в камеру гелия  $n_g(t)$ . 1 -  $n(t)$  в отсутствие оболочки; 2 -  $n_g(t)$  при включенной оболочке; 3 -  $n(t)$  в отсутствие гелия; 4 -  $n(t)$  при введении гелия.

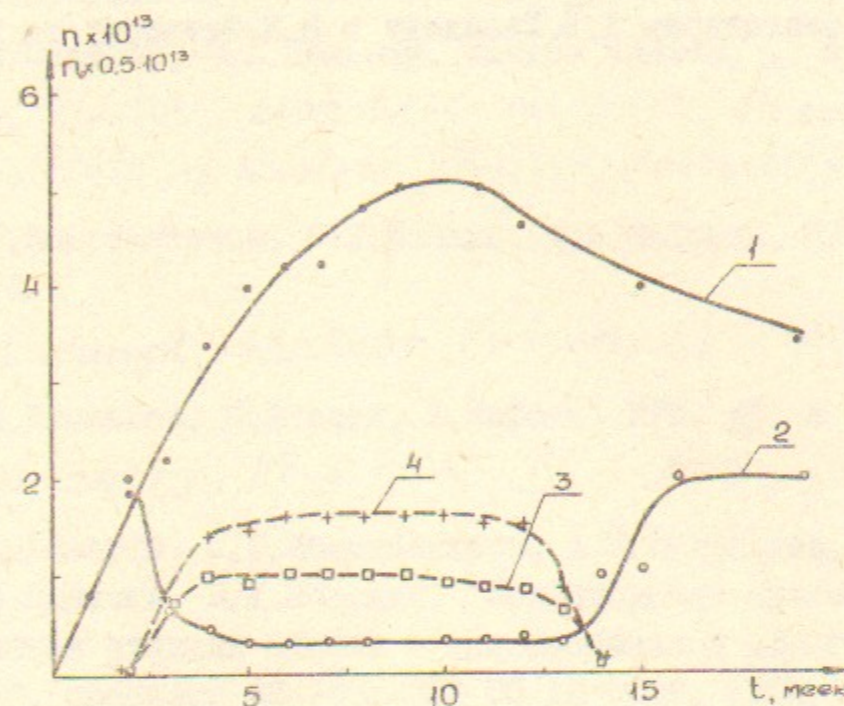


Рис. 6. Временные зависимости  $n(t)$  и  $n_g(t)$  при введении в камеру водорода. Обозначения аналогичны рис. 5.

В заключение сформулируем итог работы.

Разработан, изготовлен и успешно эксплуатируется инжектор, генерирующий поток плотной водородной плазмы с малым количеством сопутствующего газа, работающий в магнитном поле. Его конструкция позволяет изменять размеры и форму поперечного сечения потока, не затрагивая физику происходящих в инжекторе процессов.

Поток плазмы имеет плотность до  $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и обладает высокой ионизирующей способностью. Его можно использовать, как это делается на установке СВМП, для создания оболочки, защищающей горячую плазму от примесей со стенок, в качестве



насосов с высокой скоростью откачки, и в качестве электродов, позволяющих создавать в плазме электрические поля. Такие потоки можно также использовать в качестве ионных эмиттеров с большой поверхностью для источников атомарных пучков.

Авторы благодарны А.В.Киселеву и В.Е.Фетисову за помощь в работе.

#### Литература

1. A. Gibson, M. Watkins, *Proceedings of VIII European Conference on Contr. Fusion*, v. 1, p. 31, Prague, 1977
2. С.И.Брагинский, *Физика плазмы*, 1, № 3, 370, 1975.
3. В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник, *Физика плазмы*, 1, № 3, 522, 1975.
4. D.D. Ryutov, *Magnetic mirrors*, Preprint 82-114, Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 1982.
5. С.Г.Константинов, О.К.Мыскин, Ф.А.Цельник, *ПТЭ*, № 2, 38, 1973.
6. B. Lehnert, *Nuclear Fusion*, 11, 485, 1971.
7. А.И.Кисляков, Я.Штекел, К.Якубка, *ЖТФ*, 45, № 7, 1545, 1975.
8. H.W. Berry, *Phys. Rev.*, 74, 848, 1948
9. В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев, О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, В.А.Цельник, "Зондирование плазмы высокоэнергичными пучками атомов с использованием пороговых детекторов", препринт 82-144, ИЯФ СО АН СССР, 1982.
10. А.М.Кудрявцев, А.Ф.Сорокин, "Использование двойной перезарядки для измерения электрического поля и плотности плазмы", препринт 79-151, ИЯФ СО АН СССР, 1979.

В.Н.Бочаров, С.Г.Константинов, А.М.Кудрявцев,  
О.К.Мышкин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник

ЗАЩИТНАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ОБОЛОЧКА

Препринт  
№ 83-77

Работа поступила - 7 апреля 1983 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 8.07-1983 г. МН 17629

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.1,0 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 77.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90